



## 1 Entwicklungsstand und Regelwerk

Die Anwendung von Betonen mit immer höherer Druckfestigkeit ist eine Grundtendenz im Bauwesen. Als „hochfest“, d. h. über dem allgemein üblichen Festigkeitsniveau liegend, werden heute Betone mit Druckfestigkeiten über 60 N/mm<sup>2</sup> bezeichnet. Mit praxisüblichen Ausgangsstoffen und Verarbeitungsverfahren sind Bauteile mit Druckfestigkeiten um 150 N/mm<sup>2</sup> bereits realisiert. Mörtel und Betone mit Druckfestigkeiten bis 800 N/mm<sup>2</sup> befinden sich in der Entwicklung.

Der Begriff „Hochleistungsbeton“ soll verdeutlichen, dass für viele Anwendungen Dauerhaftigkeitskriterien vorrangig bzw. gleichrangig zur Festigkeit von Interesse sind, Tafel 1. Da der Widerstand von Beton gegen äußere Einflüsse wesentlich durch ein besonders dichtes Gefüge bestimmt wird, unterscheiden sich hochfester und Hochleistungsbeton aus betontechnologischer Sicht in der Regel nicht. Manchmal wird der Begriff Hochleistungsbeton auch auf weitere, außerhalb der üblichen Zusammensetzungen und Eigenschaften liegende Betone angewendet, z. B. Selbstverdichtenden Beton. Diese Betone werden im Merkblatt nicht behandelt.

**Tafel 1: Definition von hochfestem und Hochleistungsbeton**

	Bezeichnung	
	Hochfester Beton	Hochleistungsbeton
Definition	Druckfestigkeit > 60 N/mm <sup>2</sup>	für spezielle, hohe Nutzungsanforderungen entwickelte Betone, z. B. für <input type="checkbox"/> Undurchlässigkeit, <input type="checkbox"/> Widerstand gegen physikalische oder chemische Einwirkungen, <input type="checkbox"/> Festigkeit
vorrangiges Einsatzgebiet	Tragfähigkeit	Dauerhaftigkeit
	hohe Festigkeit	⇔ dichtes Gefüge

Zur Umsetzung der europäischen Normungsergebnisse ist in Deutschland eine neue Normengeneration DIN1045:2001/DIN EN 206:2001 [1, 2] erarbeitet worden. Hochfeste Normalbetone der Festigkeitsklassen C 55/67 bis C 100/115 sowie hochfeste gefügedichte Leichtbetone LC 55/60 bis LC 80/88 werden berücksichtigt. Hochfeste Betone dürfen im Rahmen der Norm für unbewehrte Betone, Stahlbeton und Spannbeton eingesetzt werden. Für die Festigkeitsklassen C 90/105, C 100/115, LC 70/77 und LC 80/88 sind allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen oder Zustimmungen im Einzelfall erforderlich.

Die neue Normengeneration löst die DAfStb-Richtlinie für hochfesten Beton [3] ab, die DIN 1045:1988 [4] für Normalbeton auf die Festigkeitsklassen B 65 bis B 115 er-

weiterte. Für einen bauaufsichtlich festgelegten Übergangszeitraum bis Ende 2004 können wahlweise alte oder neue Normengeneration genutzt werden.

## 2 Stoffliche Grundlagen

### 2.1 Wasserzementwert

Für die Herstellung hochfester Betone sind Wasserzementwerte  $\leq 0,35$  notwendig. Eine Untergrenze ergibt sich durch die Gewährleistung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit derzeit bei ca. 0,20.

### 2.2 Zemente

Es können Standardzemente eingesetzt werden. In Deutschland kamen bisher z.B. Portlandzemente CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R und CEM I 52,5 N aber auch hüttensandhaltige Zemente (CEM II-S, CEM III) zum Einsatz. Zur Sicherung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit ist ein geringer Wasseranspruch vorteilhaft. Die Zementgehalte liegen i.d.R. zwischen 350 kg/m<sup>3</sup> und 500 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.3 Gesteinskörnungen

Bei hochfesten Betonen vermindert sich die Festigkeitsdifferenz zwischen Gesteinskörnungen und Zementstein, so dass der Einfluss der Gesteinskörnungen auf Festigkeits- und Verformungseigenschaften im Vergleich zum normalfesten Beton wächst. Um sicher Druckfestigkeiten über 100 N/mm<sup>2</sup> erreichen zu können, sind gebrochene Gesteinskörnungen notwendig. Gute Erfahrungen liegen z.B. mit Basalt-, Diabas- und Melaphyrkörnungen vor. Die Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung sollte zwischen den Regelsieblinien A und B liegen. Als günstig haben sich Sieblinien nahe der Regelsieblinie B für die Korngruppen  $\leq 2$  mm und nahe A für die Korngruppen  $> 2$  mm erwiesen, wobei die Gesteinskörnungen mehlkornarm sein sollten. Aufgrund fehlender Langzeiterfahrungen legt [2] die Verwendung von hinsichtlich der Alkalireaktion unbedenklichen Gesteinskörnungen fest.

### 2.4 Zusatzstoffe

Neben sehr niedrigen Wasserzementwerten stellt die Zugabe von silikatischen Feinststäuben s (genannt auch Silikastaub, Mikrosilika, engl. silica fume, silica dust) einen typischen Unterschied zu normalfesten Betonen dar. Die Betonfestigkeitsklassen C 55/67 und C 60/77 lassen sich aber auch ohne Silikastaubzusatz zielsicher herstellen. Silikastaub, dessen mittlere Korngröße etwa ein Zehntel der mittleren Korngröße des Zements beträgt, entsteht als Nebenprodukt bei der Abgasreinigung in der Silicium- und Ferrosiliciumproduktion. Den Einsatz im Beton regeln allgemeine bauaufsichtliche oder europäisch-technische Zulassungen. Im Rahmen der europäischen Normung wird DIN EN 13263 [5] die Zulassungen ersetzen.

Die Wirkungsweise von Silikastaub im Beton beruht auf drei Effekten:

- Ausfüllen der Porenräume zwischen den Zementteilchen; das Zementsteingefüge wird dichter,

**Tafel 2: Anwendungsregeln für die gemeinsame Verwendung von Silikastaub s und Flugasche f**

Zementart	s/z [Masseanteile]	f/z [Masseanteile]
CEM I	≤ 0,11	≤ 3 · (0,22 – s/z)
CEM II-S CEM II-T CEM II/A-LL CEM III/A		≤ 3 · (0,15 – s/z)
Zemente mit Silikastaub als Hauptbestandteil	Silikastaub als Zusatzstoff unzulässig	≤ 0,15 für CEM II/A-D
alle anderen Zemente	gemeinsame Verwendung von Flugasche und Silikastaub unzulässig	

- festigkeitssteigernde, puzzolische Reaktion mit Calciumhydroxid,
- Verbesserung des Verbunds zwischen Gesteinskörnung (Zuschlag) und Zementstein.

Zur Sicherung der Dauerhaftigkeit (Korrosionsschutz der Bewehrung) beträgt die maximale Zusatzmenge von Silikastaub 11 M.-% des Zements. Die gemeinsame Verwendung von Silikastaub und Flugasche ist möglich, wobei ebenfalls die zulässigen Zusatzmengen beschränkt werden, Tafel 2.

Silikastaub wird pulverförmig (kompaktiert, nicht kompaktiert) und als Suspension (engl. Slurry) angeboten. In Deutschland wird wegen der einfacheren Handhabbarkeit i. d. R. Silikastaubsuspension, z.B. mit 50 M.-% Feststoff und 50 M.-% Wasser, eingesetzt. Silikastaubhaltige Betone besitzen meist eine dunkle Färbung. Helle hochfeste Betone können z.B. unter Zusatz von Fällungskieselsäure (Nanosilika) oder Metakaolin hergestellt werden. Fällungskieselsäuren sind als Betonzusatzmittel (Stabilisierer) zugelassen.

### 2.5 Zusatzmittel

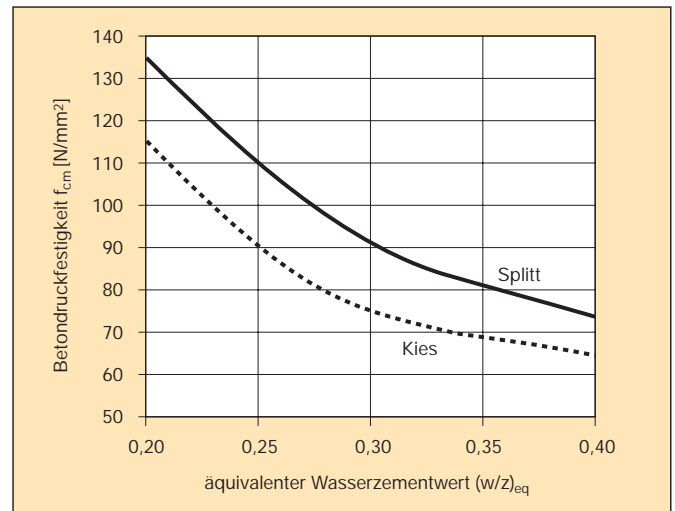
Ohne hochwirksame Betonverflüssiger bzw. Fließmittel ist die Verarbeitung von Betonen mit sehr niedrigen Wasserzementwerten unmöglich. Eine sichere Verarbeitung auf der Baustelle

erfordert weiche, besser fließfähige Konsistenzen (z.B. F4, F5). Die erforderliche Zugabemenge steigt mit sinkendem Wasserzementwert. Gute Erfahrungen liegen mit Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylaten und auf der Basis von Naphtalinharz-Melaminharz-Kombinationen vor. Die Zugabe eines Verzögerers kann sinnvoll sein, um ausreichende Verarbeitungszeiten zu sichern.

- Die Zugabemengen der Zusatzmittel sind zu begrenzen auf
  - max. 70 g/kg bzw. max. 70 ml/kg Zement bei Dosierung eines verflüssigenden Zusatzmittels und
  - max. 80 g/kg bzw. max. 80 ml/kg Zement bei Dosierung mehrerer Zusatzmittel.

### 2.6 Betonzusammensetzung

Bei hochfesten Betonen ist eine Erstprüfung mit den vorgesehenen Ausgangsstoffen (Art, Hersteller, Ort der Gewinnung) erforderlich. Dabei sind auch vorgesehene Fließmittelzugaben auf der Baustelle zu berücksichtigen.



**Bild 1: Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom äquivalenten Wasserzementwert bei hochfesten Betonen**

**Tafel 3: Anhaltswerte für die Zusammensetzung hochfester Betone**

Betonfestigkeit			C 55/67	C 60/75	C 60/75	C 70/85	C 70/85	C 80/95	C 100/115
Zementgehalt bei	CEM I 42,5 R	kg/m³	420	340	–	420	–	–	–
	CEM I 52,5 R	kg/m³	–	–	–	–	–	450	450
	CEM III/A 42,5 R	kg/m³	–	–	380	–	450	–	–
Silikastaubgehalt (Feststoff) s	kg/m³	–	30	30	40	40	45	45	
Flugaschegehalt f	kg/m³	–	80	–	–	–	–	100	
Wassergehalt	kg/m³	125	123	125	135	112	126	119	
Fließmittelzusatz	l/m³	4 l/m³ bis 10 l/m³ Polycarboxylate, 10 l/m³ bis 20 l/m³ Melamin-Naphtalin-Fließmittel							
Verzögererzusatz	kg/m³	–	–	–	–	–	ja	ja	
Gehalt an Gesteinskörnungen	0/2 (Sand)	kg/m³	650	640	630	630	620	660	830
	2/8 (Kies)	kg/m³	420	410	410	405	400	355	–
	8/16 (Kies)	kg/m³	790	880	770	765	725	–	–
	2/8 (Splitt)	kg/m³	–	–	–	–	–	–	480
	8/16 (Splitt)	kg/m³	–	–	–	–	–	760	770
äquivalenter Wasserzementwert (w/z) <sub>eq</sub> nach Gleichung (1)	–	0,32	0,35	0,32	0,32	0,27	0,28	0,26	
Ausbreitmaß (Fließmittelzugabe 45 min nach Herstellung)	a <sub>10</sub>	cm	45 ... 55						≈ 45
	a <sub>45, FM</sub>	cm	55 ... 65						≈ 55
	a <sub>90</sub>	cm	45 ... 55						≈ 45
Frischbetonrohichte	kg/dm³	2,41	2,39	2,40	2,41	2,40	2,41	2,48	
Druckfestigkeit (150-mm Würfel, Wasserlagerung) nach	1 d	N/mm²	30	35	35	40	35	60	65
	7 d	N/mm²	60	75	70	80	75	100	115
	28 d	N/mm²	80	90	90	100	100	125	135
	56 d	N/mm²	85	95	100	110	115	130	140

Betonentwürfe hochfester Betone erfolgen meist auf der Grundlage bereits ausgeführter Betonmischungen. Tafel 3 enthält Betonzusammensetzungen für verschiedene Festigkeitsklassen, die Anhaltswerte für Voruntersuchungen oder Erstprüfungen geben. Je nach eingesetzten Ausgangsstoffen können deutliche Änderungen in der Betonzusammensetzung notwendig werden.

Zur Abschätzung des erforderlichen äquivalenten Wasserzementwerts kann Bild 1 genutzt werden, wobei die Festigkeitsbeiträge der Zusatzstoffe berücksichtigt werden:

$$(w/z)_{eq} = \frac{w}{z + k_f \cdot f + k_s \cdot s} \quad (1)$$

Hohe Mehlkorn- und Feinstsandgehalte führen zu klebrigen, schwer verarbeitbaren Betonen und beeinflussen das Verformungsverhalten ungünstig. Der höchstzulässige Mehlkorn- und Feinstsandgehalt wird deshalb für hochfeste Betone beschränkt, Tafel 4.

**Tafel 4: Höchstzulässiger Mehlkorngehalt für hochfeste Betone und Leichtbetone**

Zementgehalt <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	Höchstzulässiger Mehlkorngehalt [kg/m <sup>3</sup> ] bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von	
	16 mm bis 63 mm	8 mm
≤ 400	500	500
450	550	550
≥ 500	600	600

<sup>1)</sup> Interpolation zulässig

### 3 Betonherstellung und -verarbeitung

#### 3.1 Dosieren und Mischen

Ein zusätzlicher Dosiervorgang ergibt sich durch die Zugabe von Silikastaubsuspension. Sie wird z. B. in 1-m<sup>3</sup>-Containern geliefert und muss frostfrei gelagert werden. Bei Lagerzeiten über 7 Tage kann eine Homogenisierung erforderlich werden.

Die zähere, klebrige Konsistenz des Frischbetons erhöht die notwendige Mischintensität. Je nach Betonzusammensetzung und Mischer sind Mischzeiten zwischen 60 s (Leichtbeton 90 s) und 180 s nach Zugabe aller Ausgangsstoffe angemessen. Um eine optimale Homogenisierung speziell der Feinststoffe zu erzielen, hat sich die Dosierreihenfolge Gesteinskörnungen, Zement, Wasser und anschließend Flugasche und Silikastaubsuspension als günstig erwiesen. Zur optimalen Wirkung der Zusatzmittel sollten diese nach der Wasser- und Silikastaubzugabe dosiert werden. Mischreihenfolge und -zeit sind in einer Mischanweisung festzulegen.

Bei der Herstellung hochfester Betone verschmutzen die Mischer aufgrund der klebrigen Gemische schneller, so dass zusätzliche Reinigungen notwendig sein können. Mischen mit Dampfzuführung ist unzulässig.

Bei Transportbeton und längeren Fahrstrecken ist oft Fließmittel auf der Baustelle nachzudosieren, um die Verarbeitungskonsistenz im weichen oder fließfähigen Bereich einzustellen. Das Fließmittel muss gleichmäßig in der Mischtrommel des Fahrmischers verteilt werden, z.B. mit Sprühlanzen. Die Mindestmischzeiten betragen 1 min/m<sup>3</sup> Beton bzw. mindestens 5 min. Der Fahrmischer ist bei Befüllung auf Spülwasserreste zu kontrollieren.

Der Betoniertermin ist dem Transportbetonwerk mindestens zwei Tage im Voraus mitzuteilen, damit Ausgangsstoffe, Geräte und Einrichtungen bereitgestellt werden können.

#### 3.2 Verarbeiten

Hochfeste Betone besitzen Verarbeitungseigenschaften, die für Bauarbeiter ungewohnt sind. Deshalb müssen auf der Baustelle

- Führungskräfte (Bauleiter, Poliere) eingesetzt werden, die

bereits an der Verarbeitung von Beton ≥ C 30/37 verantwortlich beteiligt waren und

- das Baustellenpersonal vor jedem Bauvorhaben eingewiesen werden (dies ist zu dokumentieren).

Sinnvoll und im Regelfall notwendig ist ein Verarbeitungsversuch unter Praxisbedingungen mit dem zum Einsatz kommenden Personal und den vorgesehenen Geräten, um die Pump- und Betonierbarkeit zu überprüfen. Insbesondere sollte die Oberflächenbearbeitung flächiger Bauteile im Verarbeitungsversuch abgestimmt werden (Abziehen der Oberfläche, Gefälleausbildung, Profilierungen usw.).

Hochfeste Betone können sowohl mit Kübel als auch mit Pumpe eingebaut werden, wenn dies im Verarbeitungsversuch nachgewiesen wurde. Im Vergleich zu normalfesten Betonen ist mit einem schnelleren Ansteifen zu rechnen, wenn keine verzögernden Zusatzmittel zugegeben werden. Die Verwendung hochfester Betone im Gleit- oder Kletterschalungsbau ist möglich, wenn der Frischbeton eine nur geringe Klebrigkeit aufweist.

Mit sinkendem Wasserzementwert und steigenden Silikastaubgehalten wächst die notwendige Verdichtungsenergie, um den Beton zu entlüften. Die Eintauchabstände von Innenrüttlern sollten auf ca. das Fünffache des Flaschendurchmessers, d.h. 30 cm bis 50 cm, reduziert werden.

#### 3.3 Nachbehandeln

Die Anwendung der Mindestnachbehandlungszeiten nach DIN 1045-3:2001 [1] bedeutet, dass in vielen Fällen bereits nach einem Tag die Nachbehandlung beendet werden könnte. Mit dieser kurzen Nachbehandlungszeit wird die volle Leistungsfähigkeit hochfester Betone in den oberflächennahen Zonen nicht erreicht. Zu empfehlen ist eine Nachbehandlungsdauer von mindestens zwei Tagen bei Innenbauteilen und drei Tagen bei Außenbauteilen. Günstig wirkt sich eine wasserzuführende Nachbehandlung aus, um der Selbst austrocknung des Betons infolge geringer Wasserzementwerte und dabei möglichen Mikrorissbildungen vorzubeugen. Die Nachbehandlung muss sofort nach Verdichtungsende beginnen.

#### 3.4 Qualitätssicherung

Bei der Herstellung hochfester Betone stellen die Normen DIN EN 206-1:2001 und DIN 1045-2:2001 [1, 2] erhöhte Anforderungen an die Produktionskontrolle. Um eine durchgängige Qualitätssicherung zu gewährleisten, muss ein Qualitätssicherungsplan aufgestellt werden, der

- Lieferung der Ausgangsstoffe,
- Betonherstellung und -transport,
- Betonverarbeitung auf der Baustelle oder im Fertigteilwerk,
- Vorgehen bei Abweichungen vom Soll,
- Festlegung von Grenzwerten einschließlich der Schnittstellen und personellen Verantwortlichkeiten umfasst.

Für die Überprüfung der maßgebenden Frisch- und Festbetoneigenschaften beim Betonieren werden hochfeste Betone in die Überwachungskategorie 3 eingeteilt.

### 4 Betoneigenschaften

#### 4.1 Druckfestigkeit

Hochfester Beton wird nach seiner Druckfestigkeit geprüft (i.d.R. nach 28 Tagen). Tafel 5 gibt einen Überblick über Festigkeitsklassen und Festigkeitskennwerte. Die Mindesthäufigkeit der Probenahme zur Beurteilung der Konformität zeigt Tafel 6, die Konformitätskriterien enthält Tafel 7. Hochfeste Betone dürfen nicht in Betonfamilien eingeordnet werden.

Bei der Bauausführung ist eine Annahmeproofung des Betons durchzuführen. Der Beton ist anzunehmen, wenn seine Identität

**Tafel 5: Festigkeitsklassen des hochfesten Betons**

(Referenzbedingungen: Zylinder (Ø 150 mm, Höhe 300 mm) bzw. Würfel (Kantenlänge 150 mm, Lagerung nach EN 12390-2))

Betonfestigkeitsklasse	Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit $f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Charakteristische Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit $f_{ctm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
C 55/67	55	67	63	4,2
C 60/75	60	75	68	4,4
C 70/85	70	85	78	4,6
C 80/95	80	95	88	4,8
C 90/105	90	105	98	5,0
C 100/115	100	115	108	5,2
			$f_{cm} = f_{ck} + 8$	$f_{ctm} = 2,12 \ln(1 + f_{cm}/10)$

**Tafel 6: Mindesthäufigkeit der Probenahme zur Beurteilung der Konformität bei hochfesten Betonen**

Herstellung	Mindesthäufigkeit der Probenahme	
	Erste 50 m <sup>3</sup> der Produktion	Nach den ersten 50 m <sup>3</sup> der Produktion <sup>1)</sup>
Erstherstellung (bis mindestens 35 Ergebnisse erhalten wurden)	3 Proben	1/100 m <sup>2</sup> oder 1/Produktionstag
Stetige Herstellung <sup>2)</sup> (wenn mindestens 35 Ergebnisse verfügbar sind)		1/200 m <sup>2</sup> oder 1/Produktionstag

<sup>1)</sup> Die Probenahme muss über die Herstellung verteilt sein und für je 25 m<sup>3</sup> sollte höchstens eine Probe genommen werden.

<sup>2)</sup> Wenn die Standardabweichung der letzten Prüfergebnisse  $1,37 \sigma$  überschreitet, ist die Probenahmehäufigkeit für die nächsten 35 Prüfergebnisse auf diejenige zu erhöhen, die für die Erstherstellung gefordert wird.

**Tafel 7: Konformitätskriterien für die Druckfestigkeit bei hochfesten Betonen**

Herstellung	Anzahl n der Ergebnisse in Reihe	Kriterium 1	Kriterium 1
		Mittelwert von n Ergebnissen $f_{cm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	jedes einzelne Prüfergebnis $f_{ci}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Erstherstellung	3	$\geq f_{ck} + 5$	$\geq f_{ck} - 5$
Stetige Herstellung	15	$\geq f_{ck} + 1,48 \sigma$ , $\sigma \geq 5 \text{ N/mm}^2$	$\geq 0,9 f_{ck}$

**Tafel 8: Prüfhäufigkeit und Annahmekriterien für die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung bei hochfesten Betonen und Verwendung von Transportbeton (beide Kriterien müssen erfüllt sein).**

Anzahl n der Einzelwerte	Kriterium 1 Mittelwert $f_{cm}$ von n Einzelwerten [N/mm <sup>2</sup> ]	Kriterium 1 jeder Einzelwert $f_{ci}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Prüfhäufigkeit
3 bis 4	$\geq f_{ck} + 1$	$\geq f_{ck} - 4$	für jeden Beton mindestens 3 Probekörper <input type="checkbox"/> je höchstens 50 m <sup>3</sup> <input type="checkbox"/> je 1 Betoniertag
5 bis 6	$\geq f_{ck} + 2$	$\geq f_{ck} - 4$	
> 6	$\geq f_{ck} + \left(1,65 - \frac{2,58}{\sqrt{n}}\right) \sigma$ $\sigma = 4 \text{ N/mm}^2$ für $6 < n < 35$ $\sigma \geq 5 \text{ N/mm}^2$ für $n \geq 35$	keine Forderung	

mit der Grundgesamtheit nachgewiesen wird, für die eine Übereinstimmungsbescheinigung erteilt wurde. Prüfhäufigkeit und Annahmekriterien für hochfeste Betone nach Eigenschaften bzw. für Transportbeton enthält Tafel 8.

Bei der Zuordnung von Festigkeitsklassen nach alter und neuer Normengeneration, Tafel 9, ist zu berücksichtigen, dass sich Nachweiskriterien, Prüf- sowie Lagerungsbedingungen unterscheiden, Tafel 9 und 10.

**Tafel 9: Zuordnung von Festigkeitsklassen nach alter und neuer Normengeneration für hochfeste Betone**

DAfStb-Richtlinie für hochfesten Beton	DIN EN 206-1: 2001 / DIN 1045-2: 2001
B 65	C 55/67
B 75	C 60/75
B 85	C 70/85
B 95	C 80/95
B 105	C 90/105
B 115	C 100/115
DIN 4219-11: 1979	
LB 55	LC 50/55
-	LC 55/60
-	LC 60/66
-	LC 70/77
-	LC 80/88

#### 4.2 Formänderungsverhalten

Der Elastizitätsmodul nimmt mit steigender Druckfestigkeit zu, Tafel 11. Die Rechenwerte basieren auf der Nutzung quarzitischer Zuschläge. Bei anderen Zuschlägen kann der Elastizitätsmodul des Betons bis zu 25 % von den Rechenwerten der Tafel 11 abweichen.

Der Elastizitätsmodul hochfester Leichtbetone berechnet sich

$$E_{lcm} = \frac{\rho}{2200 \text{ kg/m}^3} \cdot E_{cm} \quad (2)$$

Hochfeste Betone weisen eine höhere Materialsprödigkeit als normalfeste Betone auf, d.h.

- linear-plastisches Verhalten bis zu einem höheren Lastniveau,
- vergrößerte Stauchung bei Erreichen der Bruchlast,
- nur geringe ertragbare Stauchungen nach Erreichen der Bruchlast.

**Tafel 10: Druckfestigkeitsprüfung von hochfestem Normalbeton nach alter und neuer Normengeneration**

	DIN 1045: 1988 und DafStb-Richtlinie für hochfesten Beton	Druckfestigkeitsprüfung nach DIN EN 206-1: 2001 / DIN 1045-2: 2001
Referenzdruckfestigkeit	$\beta_{w200}$	$f_{c, cyl}, f_{c, cube}$
Referenzprobekörper	Würfel, Kantenlänge 200 mm	Zylinder, Ø 150 mm, Höhe 300 mm oder Würfel, Kantenlänge 150 mm
Referenzlagerung	nach DIN 1048-5 bis zum 7. Tag Feuchtlagerung, danach bis zum 28. Tag Trockenlagerung	nach pr EN 12390-2 bis zum 28. Tag Feuchtlagerung
Umrechnung	Unterschiedliche Probekörperformen $\beta_{w200} = 0,92 \cdot \beta_{w100}$ $\beta_{w200} = 0,95 \cdot \beta_{w150}$ $\beta_{w200} = 1,10 \cdot \beta_{c, cyl, \varnothing 150/200}$	Unterschiedliche Lagerungsbedingungen (Probekörper dürfen weiterhin nach DIN 1048-5 gelagert werden) $f_{c, cube} = 0,95 \beta_{w150} (< C 60/75)$ $f_{c, cube} = 1,0 \beta_{w200} (\geq C 60/75)$

**Tafel 11: Elastizitätsmodul hochfester Betone**

Betonfestigkeitsklasse	C 55/67	C 60/75	C 70/85	C 80/95	C 90/105	C 100/115
Rechenwert des Elastizitätsmoduls $E_{cm}$ <sup>1)</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	37800	38800	40600	42300	43800	45200

<sup>1)</sup> mittlerer Elastizitätsmodul als Sekante bei  $|\sigma| \approx 0,4 f_{cm}$

Die Regelwerke werden diesem Materialverhalten durch entsprechende Bewehrungsanordnung und konstruktive Durchbildung der Bauteile gerecht.

Im Vergleich zu normalfestem Beton ergeben sich qualitative Unterschiede beim Schwind- und Kriechverhalten hochfester Betone:

- ❑ das Gesamtschwinden ist anfangs höher, später auf vergleichbarem Niveau oder geringer (das Trocknungsschwinden nimmt ab, jedoch stärkeres chemisches Schwinden),
- ❑ geringere Kriechverformungen, der Endwert wird schnell erreicht,
- ❑ der Einfluss der Bauteilabmessungen nimmt ab.

## 5 Dauerhaftigkeit

### 5.1 Chemischer Widerstand

Durch die erhöhte Dichte und verringerte Kapillarporosität hochfester Betone verbessert sich in der Regel auch der chemische Widerstand. Wegen fehlender praktischer Erfahrungen werden im deutschen Regelwerk die Grenzwerte für sehr starken, starken und schwachen chemischen Angriff bei normalfesten Betonen auch für hochfeste Betone übernommen.

Erste Zustimmungen im Einzelfall betreffen hochfeste Betone ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen bei sehr starkem Säure- und Sulfatangriff für Kraftwerkskühltürme. Im österreichischen Siedlungswasserbau darf hochfester Beton unter bestimmten Voraussetzungen ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen bei sehr starkem chemischen Angriff eingesetzt werden.

### 5.2 Frost- und Frost-Taumittel-Widerstand

Hochfeste Betone besitzen einen hohen Frostwiderstand (Expositionsclassen XF 1 und XF 3).

Zum Frost-Taumittel-Widerstand hochfester Betone liegen international widersprüchliche Aussagen vor [7]. Für die Expositionsclassen XF 3 können hochfeste Betone sowohl mit als auch ohne Zusatz von Luftporenbildnern eingesetzt werden. Bei Expositionsclassen XF 4 muss in Deutschland auch bei hochfesten Betonen ein Luftporenbeton verwendet werden. Die Anforderungen an den Mindestluftgehalt unterscheiden sich nicht von normalfesten Betonen.

Die im europäischen Ausland und in der bisher gültigen DafStb-Richtlinie für hochfesten Beton [3] vorgesehene Möglichkeit, beim Nachweis des Frost-Taumittel-Widerstands durch ein geeignetes Prüfverfahren auch bei Expositionsclassen XF 4 auf die Zugabe von Luftporenbildnern zu verzichten, wird in DIN 1045-2:2001 [1] nicht gestattet.

## 5.3 Verhalten bei hohen Temperaturen

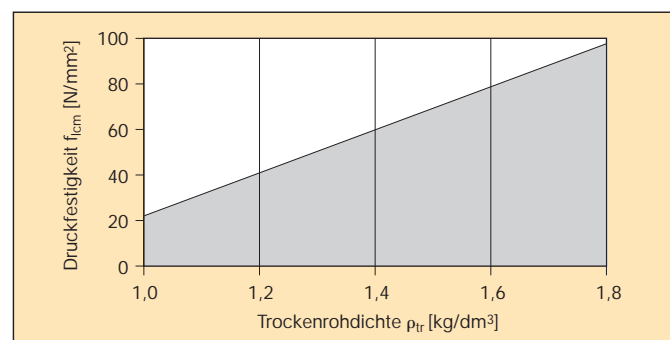
Die hohe Dichte hochfester Betone begünstigt das Auftreten von schalenartigen Abplatzungen unter Brandbeanspruchung. Bei hohen Betonfestigkeitsklassen  $\geq B 85$  und hohen Feuerwiderstandsklassen  $\geq F 90$  kann die Anordnung einer oberflächennahen Schutzbewehrung oder alternativ die Zugabe von 2 kg/m<sup>3</sup> bis 5 kg/m<sup>3</sup> Polypropylenfasern notwendig werden.

## 6 Hochfester Leichtbeton

Die Bezeichnung „hochfest“ bei Leichtbetonen hängt eng mit deren Rohdichte zusammen. Bild 2 zeigt den heute möglichen Bereich zur Herstellung gefügedichteter Leichtbetone. Die neue Normengeneration berücksichtigt hochfeste, gefügedichtete Leichtbetone der Festigkeitsklassen LC 55/60, LC 60/66, LC 70/77 und LC 80/88 mit Trockenrohddichten zwischen 800 und 2000 kg/m<sup>3</sup>. Der Überwachungsklassen 3 werden Leichtbetone  $\geq LC 30/33$  mit  $D = 1,0 \dots 1,4$  bzw.  $\geq LC 40/44$  mit  $D = 1,6 \dots 2,0$  zugeordnet.

Günstige Eigenschaften hochfester Leichtbetone sind:

- ❑ geringe Eigenlasten,
- ❑ wärmedämmende Eigenschaften,
- ❑ hohe Dauerhaftigkeit auch bei harter klimatischer Beanspruchung oder Frost-Taumittel-Angriff,
- ❑ sehr gute Verzahnung zwischen Leichtzuschlägen und Zementstein durch deren raue Oberfläche und puzzolanische Reaktionen zwischen Leichtzuschlägen und Zementstein,
- ❑ langsame Feuchteabgabe der Leichtzuschläge führt zu einer „inneren Nachbehandlung“.



**Bild 2: Erreichbare Leichtbetondruckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Rohdichte**

## 7 Anwendung

Hochfester Beton bietet sich für folgende Einsatzbereiche an:

- druckbeanspruchte Bauteile ohne größere Exzentrizitäten, z.B. hochbeanspruchte Stützen, Wände,
- biegebeanspruchte Bauteile, evtl. vorgespannt, mit schlanken Querschnitten und / oder großer Spannweite, z.B. Brückenträger,
- Bauteile mit hoher mechanischer, chemischer oder Umweltbeanspruchung, z. B. Industrieböden, hochbeanspruchte Verkehrsflächen, Bauteile bei sehr starkem chemischen Angriff, Kühltürme, Offshore-Bauwerke,
- Verbundkonstruktionen, z.B. stahlprofilummantelte Stützen, Verbunddeckenplatten, Verbundträger,
- Spezialkonstruktionen, z. B. Behälter,
- Instandsetzen von Verkehrsflächen mit kurzen Sperrfristen, z.B. Autobahnen oder Flugplätze mit 6 h bis 10 h Sperrzeit bis zur Verkehrsfreigabe,
- Verkürzung von Ausschulfristen im Hoch- und Tiefbau.

Eine umfangreiche Zusammenstellung ausgeführter Bauwerke enthält [7].

## 8 Spezielle Verfahren

### 8.1 Hochfeste Faserbetone

Dünne Dicht- und Verschleißschichten können mit hochfesten, faserbewehrten Feinkornbetonen bzw. Feinmörteln hergestellt werden (engl. SIFCON = slurry infiltrated fibre concrete). Durch einen Stahlfaserteil von ca. 10 Vol.-% resultiert ein stahlähnliches, duktileres Verhalten. Nach Ausstreuen des Stahlfasergewebes (in der Regel 50 mm bis 60 mm dick) erfolgt der Verguss des Stahlfasergewebes mit fließfähigem, hochfestem Feinmörtel (z.B. Größtkorn 0,7 mm, Zementgehalt 1000 kg/m<sup>3</sup>).

Weiterentwicklungen des Verfahrens nutzen Stahlfasermatten (engl. SIMCON), umschließen das Stahlfasergewebe durch Drahtgittermatten oder nutzen aufeinander geschichtete Drahtgittermatten (engl. DUCON = ductile concrete).

Anwendungsbereiche sind z.B.

- die Ertüchtigung von Auffangwannen für wassergefährdende Stoffe,

- Bauteile mit hohem Verschleißwiderstand, (Industrieböden, Abfallbunker, Tresore).

### 8.2 Pulverbetone

Eine weitere Steigerung der Druckfestigkeit gestatten so genannte Pulverbetone (engl. RPC = reactive powder concrete) mit Druckfestigkeiten von 200 N/mm<sup>2</sup> bis 800 N/mm<sup>2</sup>. Ermöglicht werden diese Druckfestigkeiten durch Minimierung von Mikrorissen und Poren im Betongefüge:

- Erhöhung der Homogenität durch Weglassen der groben Gesteinskörnungen (Größtkorn ≤ 1 mm),
- optimierte Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung,
- evtl. Autoklavbehandlung des jungen Betons,
- sehr geringe Wassermenge um 0,10,
- Verbesserung der Duktilität durch Stahlfasernzugabe oder Stahlummhüllung des Betons.

Erste Anwendungen existieren im Brückenbau, für Fassadenverkleidungen und im Kühlturmbau.

## 9 Regelwerk

- [1] DIN 1045: 2001, Teile 1 bis 4. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton.
- [2] DIN EN 206-1: 2001. Beton, Teil 1. Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [3] Richtlinie für hochfesten Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Ausgabe 1995, erweitert [4] auf die Festigkeitsklassen B 65 bis B 115
- [4] DIN 1045: 1988. Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung.
- [5] E DIN EN 13263: Silikastaub für Beton. Entwurf 1998
- [6] DIN EN 12390-2: 2001. Betonprüfverfahren - Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen.

## 10 Literatur

- [7] Richter, T.: Hochfester Beton - Hochleistungsbeton. Verlag Bau + Technik, Düsseldorf 1999
- [8] König, G.; Tue, Nguyen Viet, Zink, M.: Hochleistungsbeton. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2001
- [9] Richter, T.: Anwendung von Betonen mit hoher Druckfestigkeit. Beton 52 (2002)) H. 7+8, S. 344 ... 353

## Bauberatung Zement



Wir beraten Sie in allen Fragen der Betonanwendung

Bauberatung Zement Bayern	Rosenheimer Str. 145 g	81671 München	Tel. 089/45098490	Fax: 45098498	eMail:BB_Muenchen@BDZement.de
Bauberatung Zement Bayern	Rotterdamer Straße 7	90451 Nürnberg	Tel. 0911/93387-0	Fax: 9338733	eMail:BB_Nuernberg@BDZement.de
Bauberatung Zement Beckum	Annastraße 3	59269 Beckum	Tel. 02521/ 873020	Fax: 873029	eMail:BB_Beckum@BDZement.de
Bauberatung Zement Düsseldorf	Schadowstraße 44	40212 Düsseldorf	Tel. 0211/353001	Fax: 353002	eMail:BB_Duesseldorf@BDZement.de
Bauberatung Zement Hamburg	Immenhof 2	22087 Hamburg	Tel. 040/2276878	Fax: 224621	eMail:BB_Hamburg@BDZement.de
Bauberatung Zement Hannover	Hannoversche Str. 21	31319 Sehnde-Höver	Tel. 05132/6015	Fax: 6075	eMail:BB_Hannover@BDZement.de
Bauberatung Zement Ost	Luisenstraße 44	10117 Berlin-Mitte	Tel. 030/28002-400	Fax: 28002450	eMail:BB_Berlin@BDZement.de
Bauberatung Zement Ost	Dohnanystr. 28-30	04103 Leipzig	Tel. 0341/6010201	Fax: 6010290	eMail:BB_Leipzig@BDZement.de
Bauberatung Zement Stuttgart	Leonberger Straße 45	71229 Leonberg	Tel. 07152/71081-82	Fax: 9792960	eMail:BB_Stuttgart@BDZement.de
Bauberatung Zement Wiesbaden	Friedrich-Bergius-Str. 7	65203 Wiesbaden	Tel. 0611/1821170	Fax: 182117-16	eMail:BB_Wiesbaden@BDZement.de

08.02

Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. · Postfach 510566 · 50941 Köln · <http://www.BDZement.de> · eMail:Bauberatung@BDZement.de